



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní



NÁVRH ZADNÍ ODPRUŽENÉ JEDNORAMENNÉ NÁPRAVY MOTOCYKLU

Bakalářská práce

Studijní program: B2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301R000 – Strojní inženýrství
Autor práce: **Petr Stejskal**
Vedoucí práce: doc. Dr. Ing. Pavel Němeček





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Mechanical Engineering ■

PROPOSAL OF REAR SUSPENSION SINGLE-SIDED MOTORCYCLE AXLE

Bachelor thesis

Study programme: B2301 – Mechanical Engineering
Study branch: 2301R000 – Mechanical Engineering
Author: **Petr Stejskal**
Supervisor: doc. Dr. Ing. Pavel Němeček



Nahradit originálem zadání

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

NÁVRH ZADNÍ ODPRUŽENÉ JEDNORAMENNÉ NÁPRAVY MOTOCYKLU

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem zadní odpružené jednoramenné nápravy motocyklu a návrhem náboje. Práce je rozdělena do několika částí. V rešeršní části je popisován současný stav a dále se postupně práce zabývá vlastním řešením – návrhem geometrie, 3D realizací, pevnostní analýzou a na závěr je shrnut výsledek práce a její přínos. K bakalářské práci je přiložena výkresová dokumentace a CD s elektronickou verzí práce a 3D modelem.

Klíčová slova: motocykl, odpružení, náprava, náboj, 3D CAD

PROPOSAL OF REAR SUSPENSION SINGLE-SIDED MOTORCYCLE AXLE

Annotation

This Bachelor thesis occupy with the proposal of rear suspension single-side axle of motorcycle and proposal of Wheel hub. The work is consist of a few parts. The parts of research including currently statement and father you can see own solution of geometry 3D realization, analysis of strength and in by the end of this work you can see outcome of this solution and benefits. On attachment of this Bachelor thesis you can find drawings and CD with electronic version of this work and 3D model.

Keywords: motorcycle, suspension, axle, wheel hub, 3D CAD

Poděkování

Tímto děkuji panu doc. Dr. Ing. Pavlu Němečkovi za cenné rady k vypracování mé bakalářské práce. Děkuji také panu Jetmarovi za věcné připomínky a kritiku.

Obsah

1	Úvod	9
2	Současný stav v uložení zadní nápravy motocyklů	12
2.1	Konstrukce rámu	12
2.2	Odpružení.....	13
2.3	Rozdělení typů zadní nápravy	14
2.3.1	Pevná zadní stavba	14
2.3.2	Konvenční vidlice.....	15
2.3.2.1	Konvenční dvouramenná vidlice	15
2.3.2.2	Konvenční jednoramenná vidlice	16
2.3.3	Vidlice s pákovým mechanismem	17
2.3.3.1	Uni Trak – Kawasaki.....	17
2.3.3.2	Full Floater – Suzuki.....	18
2.3.3.3	Pro Link - Honda.....	18
2.3.3.4	Mono Cross - Yamaha.....	18
2.4	Speciální mechanismy	19
2.5	Zhodnocení současného stavu	19
3	Základní použité komponenty.....	20
3.1	Zadní kolo.....	20
3.2	Pružicí/tlumící jednotka	20
3.3	Brzdič	21
3.4	Ložiska	21
3.5	Řetěz.....	21
4	Návrh geometrie	22
4.1	Prvotní návrh	22
4.2	Přesný návrh geometrie.....	22
4.3	Volba tuhosti pružiny	24
4.4	Charakteristika odpružení	24
4.5	Geometrie ve 3D	25
4.5.1	Základní rozměry motocyklu	26
4.5.2	Základní rozměry zadní stavby	27
5	3D realizace a technická řešení	28
5.1	Rám.....	28
5.2	Horní a dolní rameno	28
5.2.1	Základní parametry.....	28
5.2.2	Funkční tvar.....	29
5.2.3	Uložení tlumičů	29
5.3	Hlava čepu kola	30
5.3.1	Základní parametry.....	30
5.4	Čepové spoje.....	30
5.4.1	Princip čepových spojů	30
5.4.2	Realizace čepového spoje rameno-vahadlo	31
5.4.3	Realizace čepového spoje rameno-rám.....	31
5.4.4	Zajištění proti povolení.....	32
5.5	Návrh sestavy náboje	32
5.5.1	Čep náboje	32

5.5.2	Ložiska	32
5.5.3	Náboj.....	33
5.5.4	Zajištění proti axiálnímu pohybu	33
5.5.5	Utěsnění sestavy	33
5.5.6	Přehled dílů	33
5.6	Brzdný výkon	34
5.7	Celá sestava.....	35
6	Pevnostní analýzy.....	36
6.1	Působící síly	36
6.2	Výpočtový model	36
6.3	Sestava ramen	36
6.3.1	Okrajové podmínky a působící síly	37
6.3.2	Napětí a deformace	37
6.4	Čep náboje a těhlice	39
6.4.1	Okrajové podmínky a působící síly	39
6.4.2	Napětí.....	39
7	Závěr.....	40
7.1	Závěrečné shrnutí.....	40
7.2	Kompletní model.....	41

1 Úvod

Designem motocyklů se zabývám již několik let. Myšlenka, vytvořit vlastní návrh motocyklu typu *chopper* a následně stavbu realizovat, mě přivedla do oboru strojírenství a k jeho studiu. Pouhým přemýšlením o této problematice, se mé jednotlivé „návrhy“ vyvíjely, a to nejen z hlediska vzhledu, ale hlavně z hlediska funkčnosti. Kombinace znalostí získaných ve škole, i mimo ní, mi pomáhala při realizaci této bakalářské práce. Nejedná se tedy o pouhé sbírání informací a znalostí, ale o aplikaci a využití těchto zdrojů pro praktickou realizaci myšlenky, byť zatím na úrovni návrhu.

Pro design těchto motocyklů jsou určujícím rysem prvky, jako například široká zadní pneumatika, sklon přední vidlice, rám, který není stroze funkční, ale je propracován do detailů, otevřená konstrukce (bez zakrytování) a podobně. Hlavním rysem celého stroje je ovšem jeho srdce. Většinou se jedná o dvouválcový motor s válci do „V“ (~45°), pro který je charakteristické využití nižších otáček, protože je zde dostupný dostatečný krouticí moment, díky nadčtvercové konstrukci spalovacího prostoru. V bakalářské práci jsem pro názornost použil model motoru *Harley Davidson Evolution* o zdvihovém objemu 1200 cm³.



Obr. 1: Motor *Harley Davidson Evolution* [www.hemmings.com]

Stavby takových motocyklů – *chopperů* jsou většinou zakázkové, vzniká tak pouze jeden kus. Je zde kladen důraz na individuální vzhled, což občas zachází i do extrémů. Například přední vidlice dlouhá i několik metrů, použití leteckého hvězdicového motoru a podobně. Na první pohled tedy musí být jasné, že se nejedná o sériovou záležitost.

To jsou kritéria, která určují typ těchto motocyklů. Při navrhování zadní stavby jsem se řídil myšlenkou, oprostit se od konvenčních řešení a vytvořit mechanismus, který by sám o sobě dodával motocyklu nestandardní vzhled. Stanovil jsem si ovšem několik základních podmínek, které se mi více, či méně podařilo dodržet. První podmínka, podle které nese název bakalářská práce, byla pouze jednoramenná odpružená zadní náprava (běžně zadní stavba). Při pohledu na motocykl shora tedy vidíme, že rameno „vidlice“ vede k náboji jen z jedné strany kola. Další podmínkou bylo použití velmi široké pneumatiky a odpovídajícího disku z lehkých slitin, také docílit možnosti umístit sedačku co nejnižší a dosáhnout tak celkově nízkého vzhledu motocyklu. Poslední kritérium bylo zachování funkčnosti při určování vzhledu.

Největší inspirací pro mě byl motocykl od americké firmy OCC, který nese název *BatBike* (obr. 2). Proporce tohoto motocyklu nejvíc odpovídají mé představě o celkovém konceptu.



Obr. 2: Motocykl *BatBike* od firmy OCC [www.orangecountychoppers.com]

Pro návrh geometrie zadní stavby je použit program *Linkage X3* a pro 3D realizaci návrhu je použit CAD program *SolidWorks 2012*, který nabízí kromě standardního modelovacího prostředí, také funkce pro pevnostní simulace a analýzy (jejichž výstup je v závěru mé bakalářské práce) a dále například funkci pro *rendering*, kde návrh může získat zdánlivě reálnou podobu.

Odkazy na jednotlivé díly, či výrobky, neslouží jako reklama, mají pouze demonstrovat vybrané použité sériově vyráběné komponenty, které jsem volil pro svůj návrh.

V bakalářské práci se pokusím objasnit především postup při návrhu geometrie. Dále budu popisovat technické řešení a základní principy funkcí jednotlivých mnou navrhovaných dílů, případně sestav. Pro vybrané díly provedu pevnostní analýzy. Dále se zaměřím na vizualizaci vzhledu, který je pro takovýto motocykl nedílnou součástí návrhu.

2 Současný stav v uložení zadní nápravy motocyklů

Vzorem pro stavbu motocyklového podvozku se stalo jízdní kolo. V první vývojové etapě byla ponechána i šlapadla a pouze střední část rámu byla upravena pro montáž motoru. Později dochází k nutnému zesilování a vyztužování vlastního rámu a k přestavbě pevné přední vidlice na odpruženou. Klasický jednoduchý uzavřený trubkový rám s přední paralelogramovou vidlicí byl po desetiletí nejúspěšnější koncepcí řešení podvozku motocyklu. Teprve v padesátých letech minulého století převládají teleskopické nebo výjimečně kyvné přední vidlice nad vahadlovými a začíná i rozmach strojů s odpruženým zadním kolem – nejdříve krátkou dobu s kluzákovým odpružením a později s kývačkou.[1]

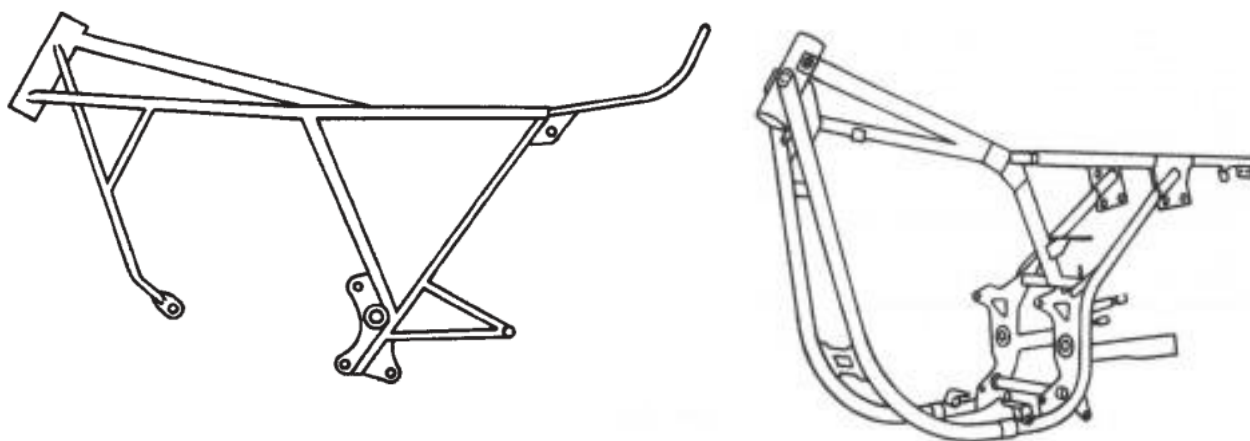
2.1 Konstrukce rámu

Abychom dokázali popsat současný stav uložení zadní nápravy, musíme začít s konstrukcí rámu.

Rám tvoří hlavní stavební a pevnostní prvek motocyklu. Nosnou část podvozku motocyklu můžeme rozdělit do dvou skupin, motocykly se samonosnou nástavbou a s nosným rámem. Samonosná nástavba se využívá zejména u malých motocyklů, například u skútrů, nebo u speciálních závodních motocyklů. Nejčastější výskyt má tak nosný rám, kde dále rozlišujeme několik druhů podle technologie výroby a konstrukčního provedení. A to rámy vyrobené z trubek, lisované, lité a kombinované. Rámy se dále dělí na uzavřené a otevřené. U otevřených rámu tvoří nosný prvek také částečně motor. Pro účely stavby motocyklu typu *chopper* je nejvhodnější uzavřený trubkový rám, který je vhodný i pro kusovou výrobu. [1]

V minulosti a v současnosti se u motocyklů používaly nebo používají tyto hlavní typy rámu:

- jednotrubkové,
- lisované,
- odlévané,
- mostové,
- kolébkové,
- dvoutrubkové,
- mřížové,
- páteřové.



Obr. 3: Otevřený rám (vlevo) a uzavřený jednotrubkový uzavřený rám Jawa (vpravo)
[www.metalmoto.cz]

2.2 Odpružení

Odpružením se zmenšuje přenos kmitavých pohybů náprav vozidla na jeho podvozkové části a rám. Chrání tak posádku, popř. přepravovaný náklad před nežádoucími otřesy. Odpružení také zvyšuje životnost některých dílů podvozku a zajišťuje stálý styk pneumatiky s vozovkou i při přejíždění výmolů. Tím je zajištěn přenos obvodových sil (hnacích a brzdících). U předního kola by ztráta styku pneumatiky s vozovkou měla nepříznivý vliv na říditelnost motocyklu. Vozidlové tlumiče tlumí kmitavý pohyb náprav a podvozku. Větší nebo menší síly od nerovností na vozovce a síly při akceleraci a brzdění přenášené do podvozku se snaží motocykl rozkývat. [1]

Odpružení a tlumení má proto následující úkoly:

- zajistit co nejlepší styk kol s vozovkou a při jízdě po nerovnostech nedovolit odskakování kol od vozovky, aby byl motocykl za každé situace bezpečně ovladatelný.
- zajistit komfort jízdy pro jezdce

Hmotnost motocyklu dělíme z hlediska odpružení na hmotnost neodpruženou a odpruženou. Do neodpružené hmotnosti patří celé přední a zadní kolo i všechny součásti pružících systémů, které společně s koly kmitají, jako například kluzáky přední vidlice. Odpruženou hmotnost tvoří hmotnost zbývajících částí motocyklu. O stupni dokonalosti odpružení motocyklu spolurozhodují především způsob zavěšení předního a zadního

kola, souhra frekvencí kmitání a tlumení a statické propnutí, velikostí odpružených i neodpružených hmot a účinnost tlumení. [1]

K bezpečné a pohodlné jízdě na nerovné vozovce je nejvýhodnější co největší poměr hodnoty odpružené hmotnosti k hmotnosti neodpružené. Z tohoto hlediska výhodnější poměry pro odpružení vycházejí zpravidla lépe u těžších velkoobjemových motocyklů, neboť poměr odpružené a neodpružené hmoty je zde velký. [1]

2.3 Rozdělení typů zadní nápravy

Pro různé rámy jsou vhodné různé typy zadních náprav. Základní dělení je na pevné a odpružené (kyvné) zadní stavby. Rozeznáváme následující druhy zadních kyvných vidlic:

- konvenční dvouramenná vidlice
- jednoramenná vidlice
- vidlice s pákovým mechanismem a s centrální pružicí a tlumicí jednotkou
- speciální (speciální mechanismy)

2.3.1 Pevná zadní stavba

Nejjednodušší soustava rám-zadní stavba je tzv. *hardtail*, neboli rám s pevnou zadní stavbou. Zde zadní stavba tvoří jeden celek s rámem. Osa zadního kola je pevně spojena s celým rámem – není zde sekundární odpružení, pouze primární, které obstarává pneumatika. Pevného rámu se hojně využívá právě při stavbách motocyklů typu *chopper*, neboť pro tyto motocykly je typická nižší provozní rychlost a klidná jízda, ale využívá se také kvůli jednoduchosti konstrukce.



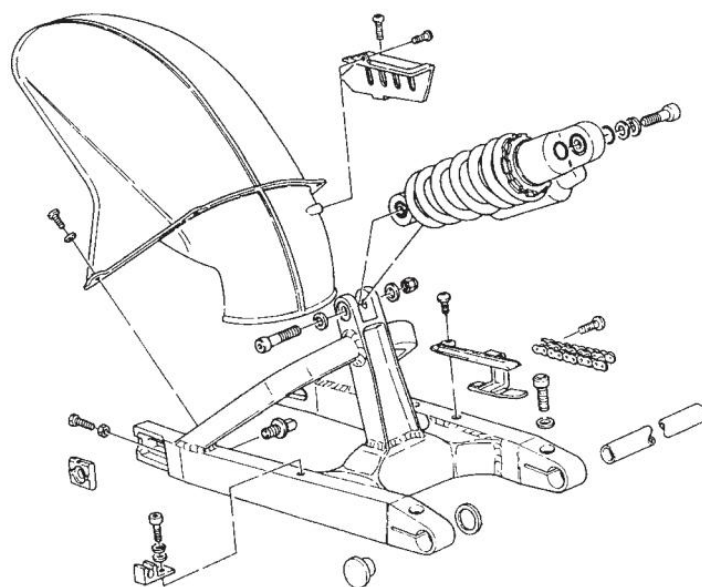
Obr. 4: Pevný rám bez odpružení - *Hardtail* [www.flyritechoppers.com]

2.3.2 Konvenční vidlice

2.3.2.1 Konvenční dvouramenná vidlice

Nejrozšířenější a konstrukčně velmi jednoduchá je konvenční dvouramenná zadní vidlice, tzv. kývačka, která je složena ze dvou pevně spojených ramen. Ramena jsou k rámu uchyceny otočně pomocí jednoho čepu (případně dvou v jedné ose) a zároveň jsou pružně uchycena šikmo uloženou centrální pružicí jednotkou (tzv. konzolová zadní vidlice), nebo dvěma postranními pružicími jednotkami. Při správném dimenzování konstrukce, vykazuje sestava vysokou tuhost, díky rovnoměrnému rozložení sil mezi obě ramena, která jsou tak namáhána především na ohyb. [1]

U motocyklů s kardanovým hřídelem slouží jedno rameno vidlice jako skříň pro kardanový hřídel. Na zadním konci vidlice je umístěna úhlová převodovka - pohon zadního kola. Kardanový hřídel vychází z převodovky motocyklu a hned za převodovkou je opatřen křížovým kloubem, který umožňuje hřídeli konat kyvný pohyby současně s vidlicí. Zadní vidlice, u motocyklů s řetězovým pohonem zadního kola, jsou opatřeny mechanismem pro posouvání zadního kola, kterým se seřizuje napnutí hnacího řetězu. Napínání řetězu posuvem zadního kola v kývačce je stále nejobvyklejší. Koncovky kývačky musí být dostatečně tuhé, aby čep zadního kola měl v drážkách bezpečné vedení. [1]



Obr. 5: Kyvná vidlice ze slitiny hliníku (Ducati 750 SS) [1]

2.3.2.2 Konvenční jednoramenná vidlice

Modifikací klasické konstrukce kývačky získáme jednoramennou (jednostrannou) zadní vidlici, tzv. jednoramennou kývačku. Jak z názvu vyplývá, konstrukce této vidlice je složena pouze z jednoho ramene. Při pohledu na motocykl shora vidíme, že rameno vidlice vede k náboji jen z jedné strany kola. Rameno je zde více namáháno a to ne jen na ohyb, ale zejména v torzi. Proto musí být dostatečně dimenzováno, což zaručí dostatečnou tuhost. O odpružení se ve většině případů stará centrálně uložená pružicí a tlumící jednotka. Přestože na první pohled vypadá jednoramenná vidlice jako nestabilní, opak je pravdou. Jednoramenná vidlice je vždy minimálně tak stabilní jako odpovídající vidlice dvouramenná. Velkou výhodou jednoramenných vidlic je jednoduchá demontáž zadního kola a dále taková konstrukce může přinést i úsporu neodpružené hmoty. [1]



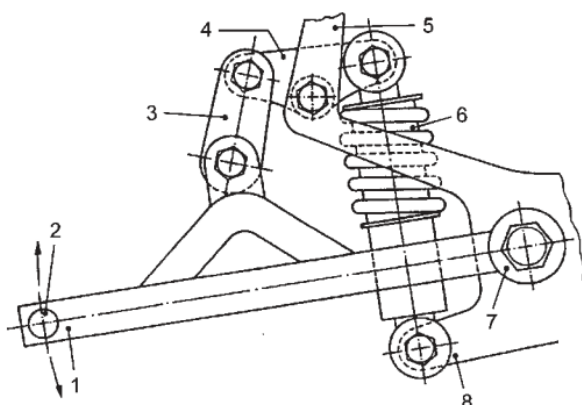
Obr. 6: Rameno jednostranné kývačky s nábojem a s diskem z lehkých slitin
[www.webike.net]

2.3.3 Vidlice s pákovým mechanismem

Zadní vidlice s pákovým mechanismem a s centrální tlumičí a pružící jednotkou je souhrnné označení pro nejrozšířenější vícečepové mechanismy. Jednotlivé typy se odlišují zejména pákovým mechanismem. Do přehledu zařazuji nejčastější druhy, respektive nejčastější mechanická provedení, kde převládají zejména systémy od čtyř velkých japonských firem. Provedení může být jak jednoramenné, tak dvouramenné. Používá se zejména u závodních silničních a terénních motocyklů.

2.3.3.1 Uni Trak – Kawasaki

U tohoto systému je zadní vidlice odpružena centrálním tlumičem přes systém pák. Tlumič odpružení je přitom uchycen v téměř kolmé poloze ve spodní části rámu. [1]

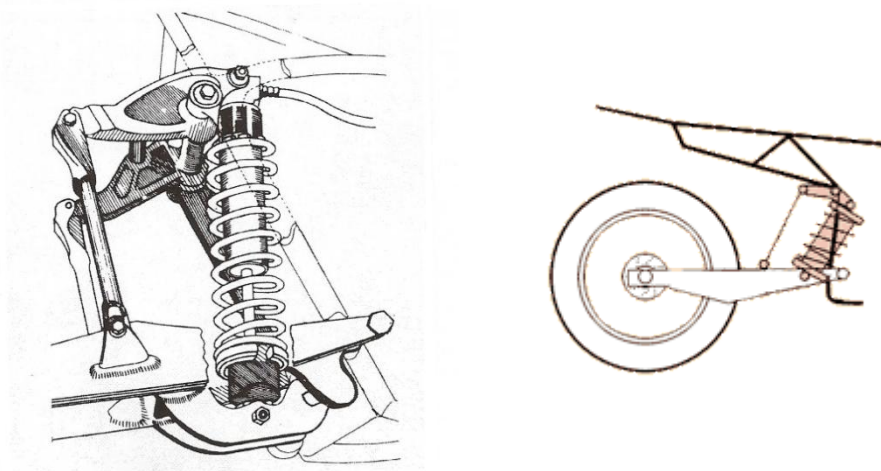


- 1 – kyvné rameno;
- 2 – hřídel zadního kola;
- 3 – vodící páka;
- 4 – kyvná páka (vahadlo);
- 5 – konzola rámu;
- 6 – centrální pružící jednotka;
- 7 – uložení kyvného ramene;
- 8 – konzola rámu.

Obr. 7: Systém odpružení zadního kola *Uni Trak* (Kawasaki) [1]

2.3.3.2 Full Floater – Suzuki

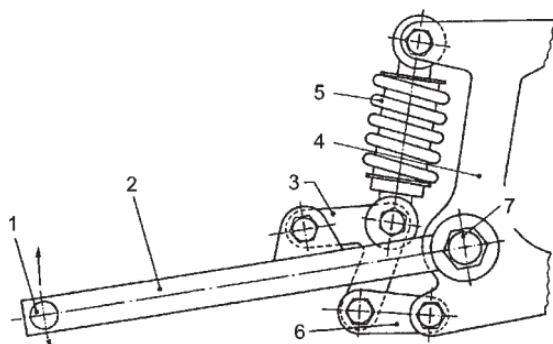
Jedná se o plovoucí systém, kde je využita páková konstrukce podobná systému *Uni Trak*. U systému *Full Floater* se jednotka odpružení neopírá o rám, ale o kyvné rameno. Šikmá kyvná páka při větším propružení zasahuje stále více do směru osy pružiny a tím systém dosahuje silnou progresivitu. [1]



Obr. 8: Systém *Full Floater* a jeho schématické znázornění [www.djebel-club.ru]

2.3.3.3 Pro Link - Honda

Komplexní systém dvou pák odpružených centrálním tlumičem uchyceným šikmo ve střední části rámu. [1]

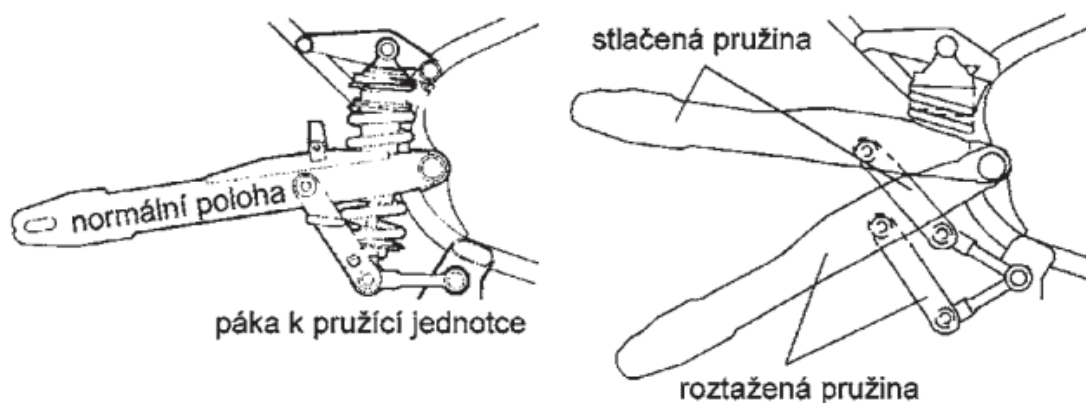


- 1 – osa zadního kola;
- 2 – kyvné rameno;
- 3 – kyvná páka (vahadlo);
- 4 – rám;
- 5 – centrální pružicí jednotka;
- 6 – vodící páka;
- 7 – uložení kyvného ramene.

Obr. 9: Systém odpružení zadního kola *Pro-Link* (Honda) [1]

2.3.3.4 Mono Cross - Yamaha

Centrální tlumič odpružení působí přes pákový držák na spodní stranu zadní vidlice. Horní držák je přitom pohyblivě uchycen na příčném nosníku spodní části rámu. Tlumič přitom stojí v téměř kolmé poloze, podobně jako u systému Honda. [1]



Obr. 10: Výkyvná vidlice s pákovým převodem - *Mono Cross* (Yamaha) [1]

2.4 Speciální mechanismy

Další speciální systémy, které vznikají například kombinací výše zmíněných základních, se ve větší míře nepoužívají. Uplatnění nachází u speciálních závodních motocyklů nebo prototypů, studií a podobně. Do této skupiny patří například systém založený na mechanismu paralelogramu, kterým se budu zabývat dále v bakalářské práci a popíšu jej v kapitole 4.1.

2.5 Zhodnocení současného stavu

Současné systémy odpružení přinášejí vhodné řešení odpružení pro různé kategorie motocyklů. Z hlediska vývoje dochází zejména ke zdokonalování mechanického provedení prvků odpružení. Vznikají však i nové systémy, které jsou ale postaveny na stávajících. Vznikají kombinováním různých systémů (například kvůli vhodnému mechanickému provedení, nebo aby nedošlo k porušení patentových práv), ale ve výsledku mají obdobnou charakteristiku jako typy popsané výše.

3 Základní použité komponenty

V této kapitole se nachází přehled použitých komponentů a jejich základní parametry.

3.1 Zadní kolo

Pro návrh zadní odpružené nápravy motocyklu je řídícím rozměrem velikost kola, tedy rozměry pneumatiky a použitého disku. Od těchto rozměrů se dále odvíjí ostatní rozměry zadní stavby. Zvolil jsem nadstandartní velikost disku r18x11 a pro tento disk pneumatiku 300/35 R18. Šířka pneumatiky je 300 mm a největší průměr pneumatiky je zhruba 667 mm.

Vhodný diskem pro tuto sestavu je výrobek americké firmy *Vicious Cycle Works*, který je dodáván i bez náboje. Jedná se o odlitek ze slitiny hliníku. Je symetrický podle tří rovin, to znamená, že paprsky jsou právě uprostřed ráfku. Průměr středové díry je 3.15", tedy 80,01 mm.



Obr. 11: Disk r18x11[autor]

3.2 Pružící/tlumící jednotka

Před navrhováním geometrie zadní stavby jsem potřeboval základní rozměry a parametry tlumiče. Proto jsem hledal firmu, která se výrobou tlumičů zabývá a která nabízí velkou variabilitu svých výrobků. Kritéria nejlépe splnila firma *Öhlins*, u které lze nezávisle na volbě tlumiče zvolit z katalogu i tuhost pružiny. Základní parametr tlumiče tedy je volná délka (rozteč čepů) 295 mm a činný zdvih 42 mm. Tuhost zvolené lineární pružiny dále rozebírám v kapitole 4.3.

3.3 Brzdič

Pro dostatečný brzdový výkon jsem zvolil dvoupístkový třmen *Brembo*, používaný například na modelech *Daytona 675*. S drobnými úpravami lze použít pro brzdový systém, který popíši dále v bakalářské práci.

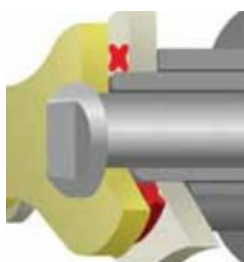
3.4 Ložiska

Dalším důležitým komponentem jsou ložiska, kterých je v sestavě celkem 11. Zde jsem volil dle katalogu firmy SKF.

3.5 Řetěz

Pro pohon zadního kola, jsem již při zadávání bakalářské práce, zvolil řetězový převod. Výhodou je menší zástavbový prostor, oproti jiným řešením, ale také lépe zapadá do konceptu motocyklu.

Pro tento účel jsem zvolil bezúdržbový řetěz japonské výroby *EK's QX-Ring*. Řetěz nevyžaduje vnější mazání, naopak by měl zůstat suchý, by se na něm nezachytávaly nečistoty a prach. Řetěz disponuje takzvaným aktivním těsněním, které má průřez ve tvaru x (viz obr. 12). Toto těsnění uchovává mazivo uvnitř řetězu a zabraňuje zánosu nečistot, řetěz tak má delší životnost. Hlavní důvod použití tohoto řetězu objasním v kapitole 5.6.



Obr. 12: Řetěz s *X-Ring* těsněním [www.ekchain.jp]

4 Návrh geometrie

4.1 Prvotní návrh

Počáteční návrh geometrie probíhal pouze v myšlenkách. Základní vize byla využít systém mechanismu zvaného paralelogram, tedy čtyř-čepového mechanismu. Nejedná se o přesný geometrický paralelogram, kde jsou dvě protilehlá ramena stejně dlouhá a vždy rovnoběžná, ale o mechanismus, pro který se ujal název paralelogram. V tomto čtyř-čepovém mechanismu nemusí být protilehlá ramena stejně dlouhá, a tudíž nemusí být v každé poloze propuštění rovnoběžná. Tento systém jsem dále zkombinoval s plovoucím systémem, kde není tlumič připevněn k rámu motocyklu, ale oba konce jsou spojeny s rameny nebo s vahadly zadní stavby. Celkově se tedy jedná o originální systém, se kterým jsem se v praxi nesetkal.

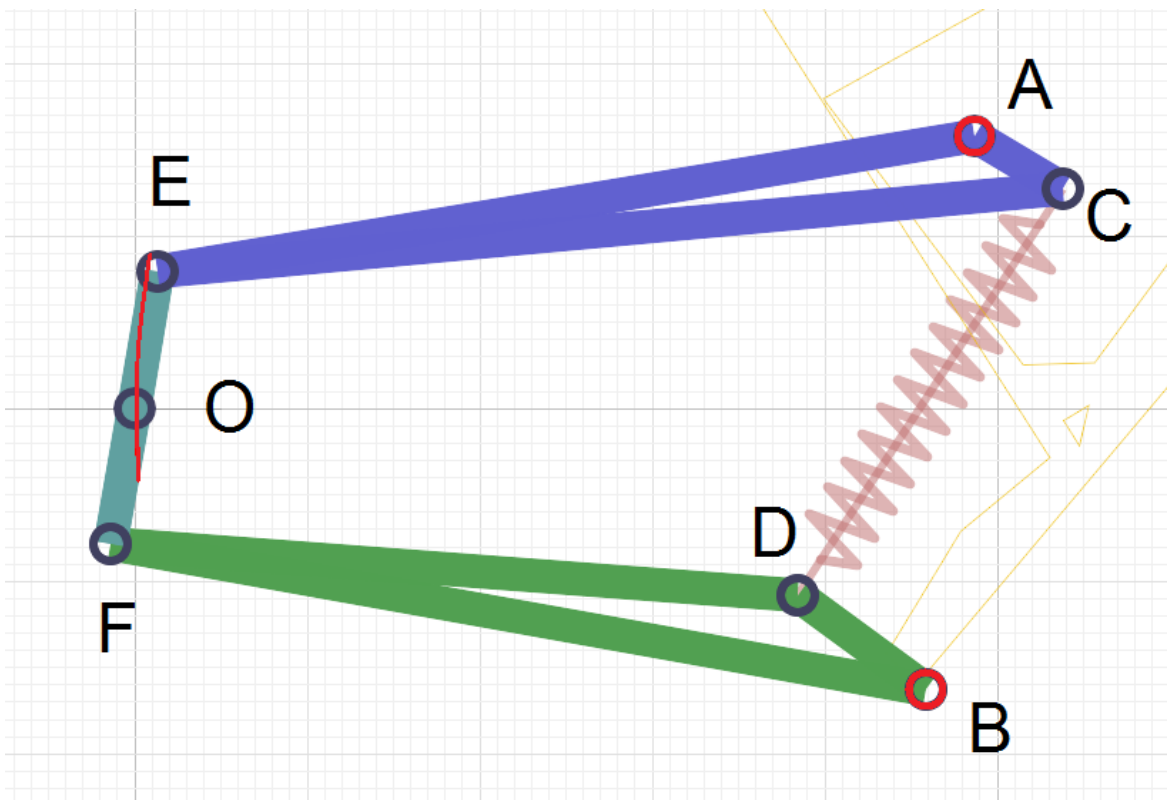
4.2 Přesný návrh geometrie

Pro geometrický návrh jsem využil program *Linkage X3*, který je primárně určen pro navrhování mechanismů odpružení u jízdních kol. S drobnou změnou vstupních parametrů lze však tento program využít pro návrh geometrie zadní stavby motocyklu (obr. 13).

Základní parametry, které bylo nutno dodržet, jsou:

- dostatečná vzdálenost osy rotace od uložení ramen v rámu, kvůli velikosti pneumatiky - alespoň 380 mm;
- rozteč čepů pro uložení tlumiče 295 mm, zdvih tlumiče 42 mm;
- celkový zdvih zadního kola ~130 mm;
- charakteristika odpružení, která by měla být lineární, nebo mírně progresivní
- stlačení tlumiče při statickém zatížení, kdy je motocykl v klidu a zatížen jezdcem, 30-35%

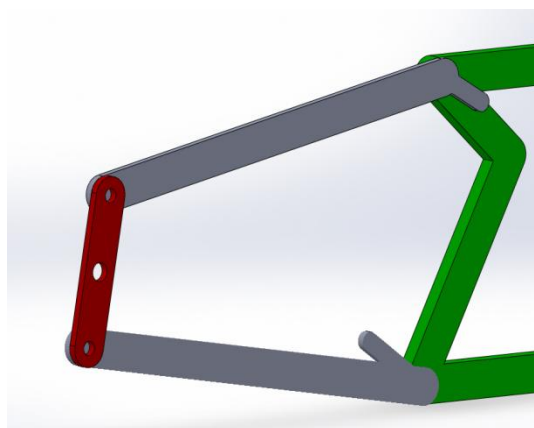
Na obrázku 13 je zachycen návrh geometrie v programu *Linkage X3*. Každý bod je určen svými souřadnicemi (počátek v bodě O). Červeně vyznačené body A a B jsou čepy, které jsou uchyceny na rám motocyklu. Body C a D představují místa uložení tlumiče na ramenech mechanismu. Body E a F jsou čepy spojující zadní vahadlo s rameny.



Obr. 13: Geometrie v programu *Linkage X3* [autor]

Bod O znázorňuje osu rotace zadního kola. Křivka, která tímto bodem prochází, představuje dráhu pohybu osy rotace při pružení. Mechanismus je v poloze statického pružení (SAG).

Zároveň, s tvorbou geometrie v programu *Linkage*, jsem vytvářel základní model (rastr) v CAD programu *SolidWorks*. Kompilací délkových rozměrů z tvorby rastru s umístěním bodů v souřadnicovém systému programu *Linkage* jsem dosáhl potřebných rozměrů a zároveň požadované charakteristiky (viz 4.3 a 4.4). Rastr pouze znázorňuje jednotlivé rozměry tvořící mechanismus zadní stavby. Od těchto rozměrů se dále bude odvíjet reálný návrh 3D modelu.



Obr. 14: Rastr geometrie [autor]

4.3 Volba tuhosti pružiny

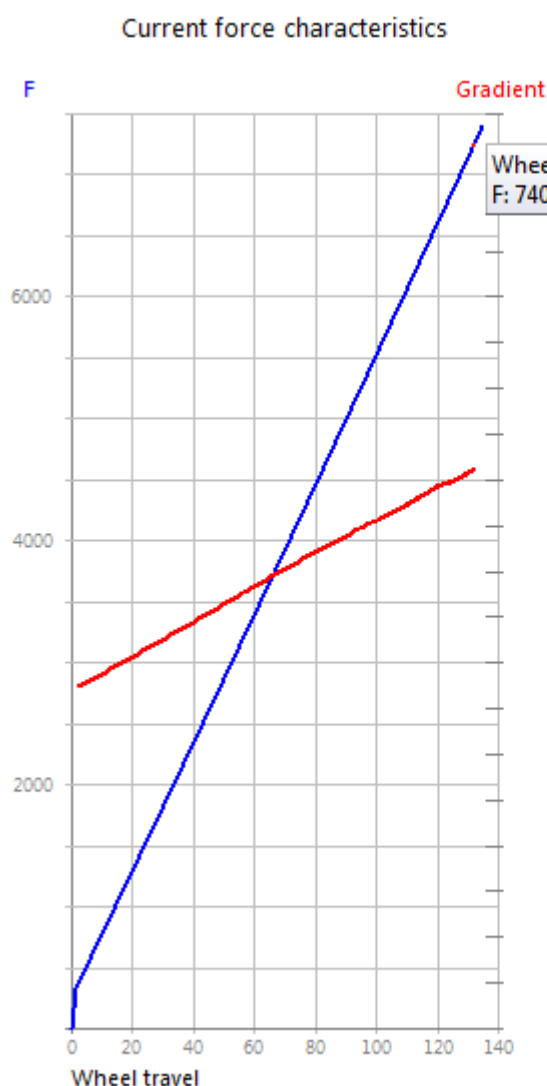
Na obrázku 15 je výpočtová aplikace v programu *Linkage* pro volbu tuhosti odpružení. Hmotnost 400 kilogramů včetně jezdce a rozložení váhy 62% na zadní kolo a 38% na přední jsou hodnoty, které jsem přibližně vypočítal po dokončení modelu. Hodnota *sag rear* je zadané statické propružení. *Preload* udává předpětí pružiny, kterým lze při zachování tuhosti pružiny měnit v určitém rozsahu statické propružení. *Result spring rate* je programem navrhovaná ideální hodnota tuhosti pružiny udávaná v librách na palec (lbs/in). Výrobce Öhlins udává tuhost u svých pružin v jednotkách newton na milimetr (N/mm). Nejbližší varianta tuhosti je tedy 520 N/mm, tomu odpovídá 2920 lbs/in. Pro dosažení požadované tuhosti jsem použil dva paralelně řazené tlumiče s pružinou o tuhosti 260 N/mm. Při takovémto řazení je výsledná tuhost pružin prostým součtem jejich tuhostí, tedy 520 N/mm.

The screenshot shows the 'Linkage' software interface for configuring spring settings. At the top, there are radio buttons for 'kg' (selected) and 'lbs'. Below this is a weight input field set to '400'. A 'Weight distribution' section shows '62% : 38%' with a slider between 'R' and 'F'. The 'Sag rear' field is set to '32%' and 'Sag front' to '25%'. The 'Spring rate' is set to '2920.00' with units 'lbs/in'. The 'Preload' is set to '1.6' with units 'mm'. A results section at the bottom shows 'Result rear sag' as '32%' and 'Result spring rate' as '2901.5 lbs/in'.

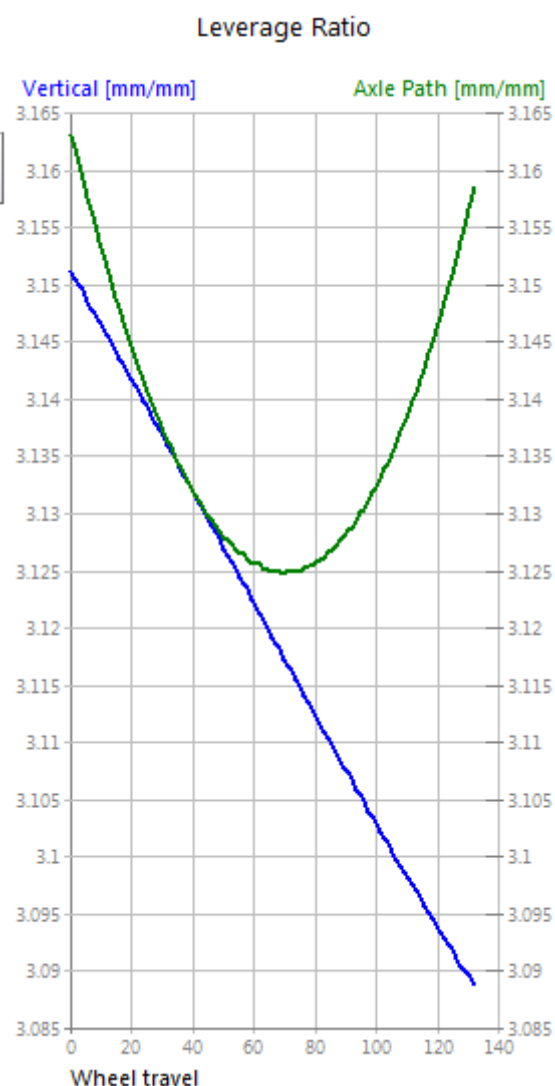
Obr. 15: aplikace zatížení [autor]

4.4 Charakteristika odpružení

Charakteristiku nám dává výstup programu *Linkage X3*, kde na grafu číslo 1 je modře vyneseno vertikální posuv v závislosti na působící síle na zadní kolo. Skok v nulovém posuvu značí předpětí pružiny. Červeně je znázorněn gradient, který nám udává charakteristiku celkového odpružení. Odpružení má tedy téměř lineární průběh. Tento fakt dále potvrzuje graf 2, kde na vodorovné ose je vertikální posuv kola a na svislé je hodnota převodové funkce (posuv kola vs. stlačení pružiny). Hodnota převodové funkce je téměř konstantní, v jednotlivých bodech se neliší více než o jednu desetinu. Modře je znázorněn vertikální posuv a zeleně je značena trajektorie. Z grafu 1 vidíme, že pro maximální vertikální posuv (*wheel travel*) 132 mm je zatěžující síla asi 7400 N (staticky).



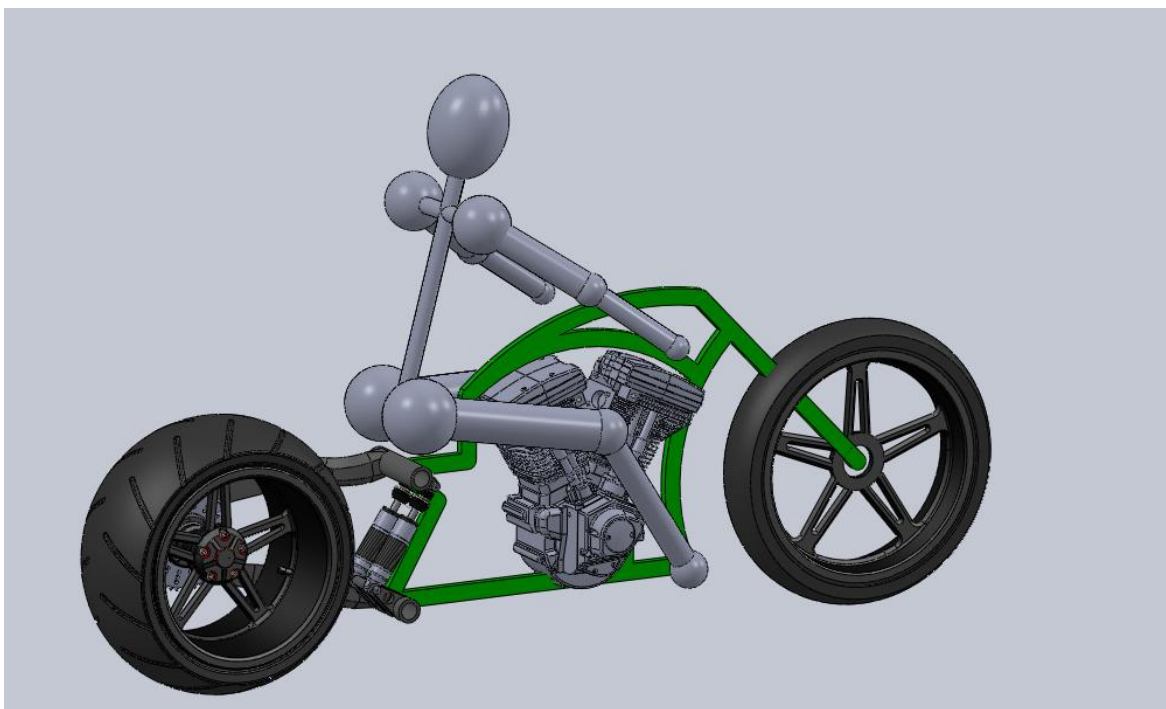
Graf 1: Charakteristika odpružení [autor]



Graf 2: Převodová funkce [autor]

4.5 Geometrie ve 3D

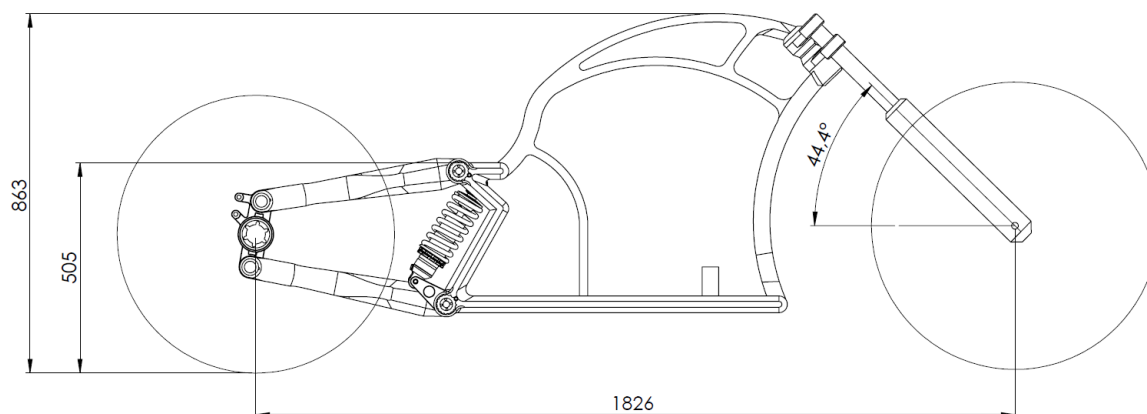
Podobně, jako s rastrem geometrie zadní stavby, jsem postupoval při navrhování rámu a celkové geometrie. Při návrhu rámu jsem zohlednil zástavbový prostor pro motor, sklon přední vidlice kolem 45°, zachování celkově nízkého vzhledu motocyklu s přihlédnutím k ergonomii. Pro tento úkol jsem ve 3D vytvořil figurínu, která rozměrově odpovídá mým proporcím (180 cm).



Obr. 16: Rastr rámu (zeleně) s kontrolou proporcí [autor]

4.5.1 Základní rozměry motocyklu

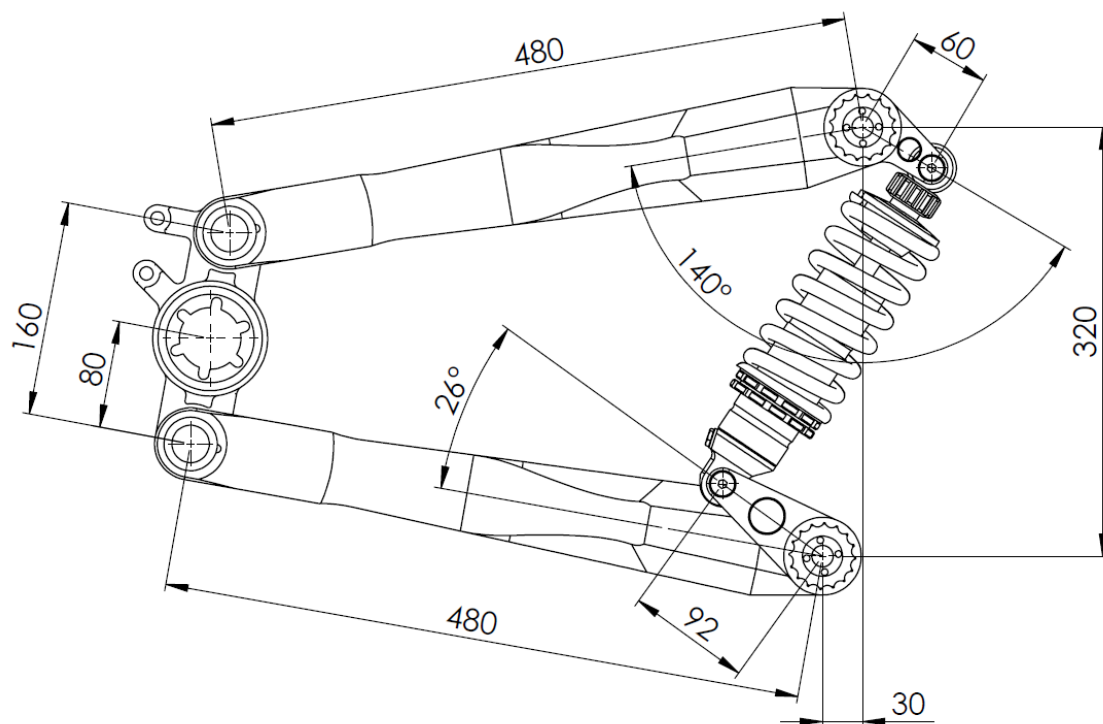
Dle stanovené geometrie jsem vytvářel celkový model. Základní rozměry motocyklu jsou na obrázku (schématu) 17. Při návrhu jsem dosáhl zajímavé hodnoty u výšky zástavbového prostoru pro sedlo (kde by ve výsledku výška i se sedlem neměla překročit 600 mm) a rozumné celkové výšky (vzhledem k povrchu vozovky). Podařilo se mi tedy dodržet zadaná kritéria, která jsem si v této oblasti stanovil. Motocykl dle základní geometrie tak působí nízkým dojmem.



Obr. 17: Základní rozměry motocyklu [autor]

4.5.2 Základní rozměry zadní stavby

Základní rozměry zadní stavby znázorňuje obrázek 18. Délka ramen, respektive rozteč čepů je u obou ramen stejná. Zadní stavba je v poloze statického zatížení, tlumič je tedy stlačen o 32%.



Obr. 18: Hlavní rozměry geometrie zadní stavby [autor]

5 3D realizace a technická řešení

V této kapitole postupně popíši rám a především hlavní díly zadní stavby, včetně náboje. Objasním technické řešení, případně výrobní postupy. Protože se nejedná o návrh pro sériovou výrobu, ale pro výrobu pouze jednoho kusu, je brán ohled hlavně na celkový vzhled a funkci, na úkor výrobních nákladů, montáže nebo složitosti technického řešení. Kromě uložení náboje na těhlici (kde jsem se inspiroval v automobilovém průmyslu), jsou všechna technická řešení zhotovena podle mých návrhů a nápadů.

5.1 Rám

Neboť rám není cílem mé práce, popíši ho velmi stručně. Jedná se o svarek z ocelových profilů (upravené normalizované profily) o tloušťce stěny 2 mm. Styčníky, respektive místa uložení čepů zadní stavby, jsou frézovány z plného materiálu na požadovaný tvar a součástí svarku.

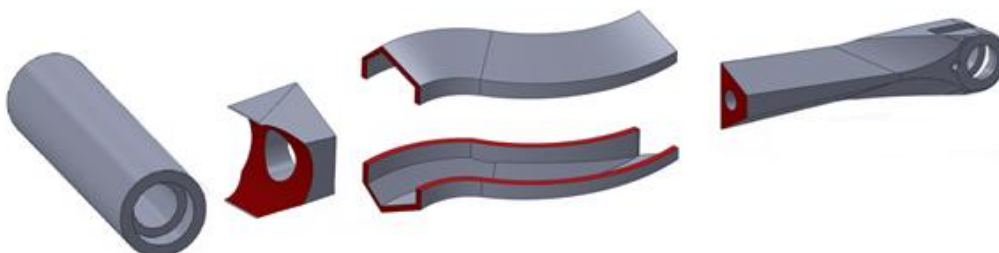


Obr. 19: Rám [autor]

5.2 Horní a dolní rameno

5.2.1 Základní parametry

Horní a dolní rameno se liší pouze v závěsu (uložení) tlumičů, jinak jsou naprosto shodná. Proto je zde budu popisovat pouze jednou. Rameno je navrženo jako ocelový svarek, skládající se z pěti dílů (+ zavěšení tlumičů), především kvůli snížení hmotnosti. Jedná se o rotační pouzdro uložení čepů (soustružení), a čtyři díly pro obrábění na CNC frézce. Vhodný svařovací postup metodou TIG.



Obr. 20: Jednotlivé díly svarku ramene [autor]

5.2.2 Funkční tvar

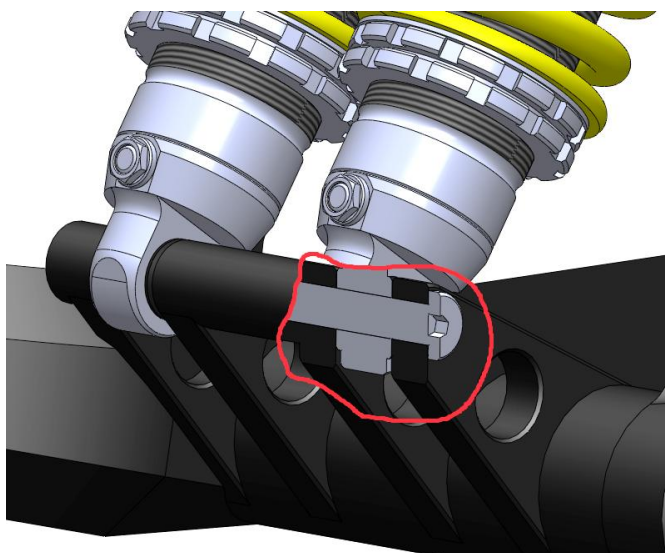
Rozteč čepů činí 480 mm. Na rameno budou působit velké ohybové momenty, ale bude namáháno i v torzi. Proto má rozšiřující se tvar směrem od čepu těhlice k čepu uložení na rám (na obrázku 20 zprava směrem doleva). Pouzdro pro čepy je záměrně konstruováno co nejdelší, nejen kvůli zavěšení pro tlumiče, ale také kvůli geometricky přesnějšímu uložení a celkové tuhosti zadní stavby. Ramena jsem podrobil analýze napětí pomocí MKP v kapitole 6.



Obr. 21: Výsledná podoba (spodního) ramene [autor]

5.2.3 Uložení tlumičů

Tlumiče jsou uchyceny pomocí lícovaného šroubu s šestihranným vnitřním vybráním, jehož dřík slouží zároveň jako čep, okolo kterého se můžou tlumiče volně pootáčet v závislosti na propružení. V posledním oku závěsu je závit, do kterého se lícovaný šroub zašroubuje. Horní a dolní závěs tlumičů jsou z hlediska konstrukce identické.



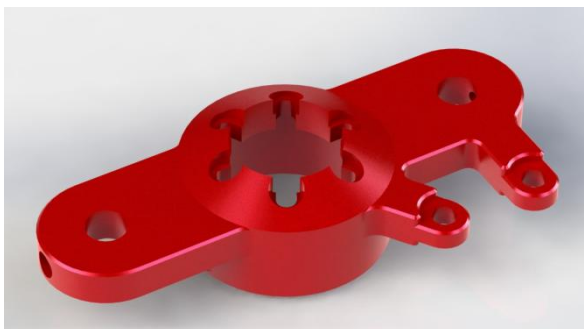
Obr. 22: Dolní závěs tlumičů [autor]

5.3 Hlava čepu kola

Hlava čepu kola, neboli těhlice, je díl, který je uložen pomocí dvou čepových spojů k hornímu a dolnímu ramenu, nese čep náboje, ale také brzdový třmen.

5.3.1 Základní parametry

Těhlice je navržena jako díl z jednoho kusu z pevnostní hliníkové slitiny 7075 obráběný na CNC. Rozteč děr čepů je 160 mm, čep náboje je v ose mezi čepovými spoji a je uložen s přesahem a zároveň dotažen šesti šrouby k těhlici. Pro brzdový třmen je zde uchycení pomocí dvou šroubů.



Obr. 23: Těhlice [autor]

5.4 Čepové spoje

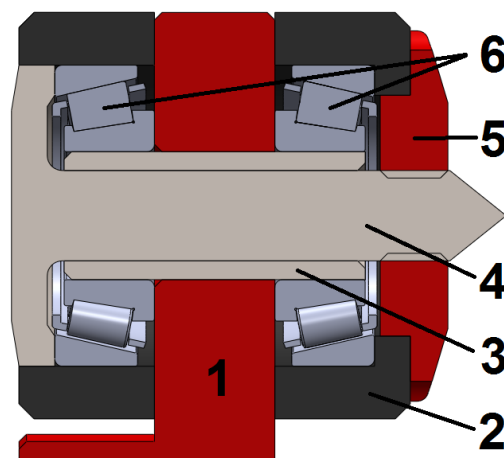
Pro úplné odstranění vůlí a minimalizaci tření je každý čepový spoj opatřen dvěma kuželíkovými ložisky. Oba čepové spoje rameno-těhlice jsou v praktickém provedení identické, stejně tak oba čepové spoje rameno-rám.

5.4.1 Princip čepových spojů

Pokud jsou dvě kuželíková ložiska uložena do „X“ nebo do „O“, dokáží takto zachytit axiální síly působící v obou směrech a zároveň plní svou funkci v radiálním směru. Z konstrukčního hlediska se jeví výhodné využít uspořádání do „X“ v uložení mezi těhlicí a rameny, uspořádání do „O“ bylo výhodné využít v uložení ramen k rámu. V uložení rameno-těhlice se vždy pár vnitřních kroužků ložiska opírá o těhlici a vnější kroužky o osazení v rameni. V uložení rameno-rám je to obdobné, vnější kroužky ložiska jsou přitlačovány k ramenu a vnitřní k rámu motocyklu. Přítlačnou sílu, tedy vymezení vůlí, obstarává závitový spoj.

5.4.2 Realizace čepového spoje rameno-vahadlo

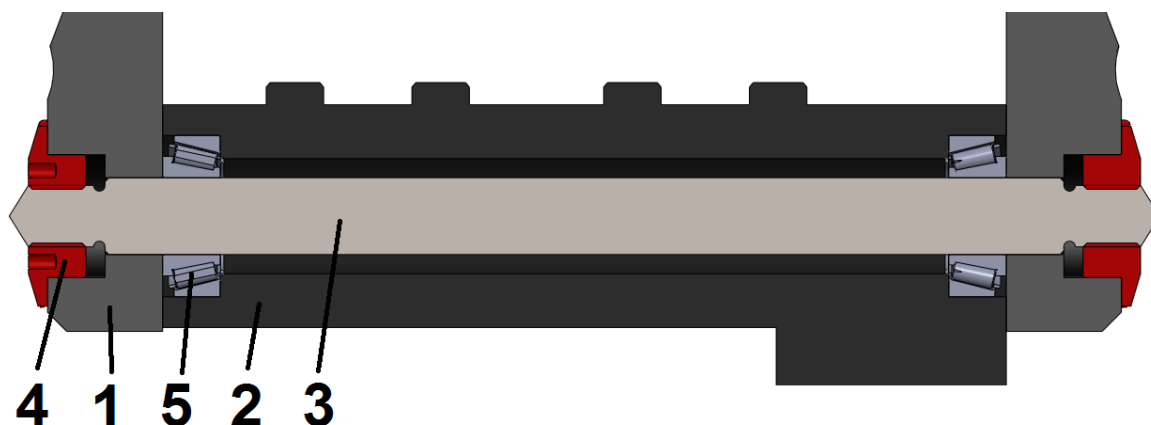
Na obrázku 24 je v řezu znázorněn čepový spoj rameno-těhlice. Na dutém vnějším čepu (3), který je přesně uložen v díře těhlice (1), jsou nasunuty vnitřní kroužky ložiska (6), vnější kroužky ložiska jsou uloženy v ramenu (2). Sestava je stažena vnitřním čepem se závitem (4) a speciální maticí (5), dojde tak k vymezení vůlí, a zároveň se může těhlice vůči ramenu volně otáčet – mezi těhlicí a ramenem jsou funkční vůle. Síly se z těhlice na rameno přenáší pouze přes valivá tělíska ložisek.



Obr. 24: Řez čepem rameno-těhlice [autor]

5.4.3 Realizace čepového spoje rameno-rám

Mezi styčné body rámu (1) je umístěno pouzdro čepu (2), které tvoří s ramenem jeden celek. V pouzdře jsou uloženy ložiska (5). Vnější kroužek ložiska se opírá o osazení v pouzdře a vnitřní o styčnou plochu rámu. Souosost vymezuje čep (3), který na obou koncích opatřen závity. Pomocí speciálních matic (4) je sestava stažena, dojde k mírné pružné deformaci rámu. Mezi styčnými plochami rámu a ramenem jsou funkční vůle. K přenosu sil mezi ramenem a rámem tedy dochází pouze za pomoci ložisek. Sestava čepového spoje je osově symetrická.



Obr. 25: Řez čepovým spojem rameno-rám [autor]

5.4.4 Zajištění proti povolení

Proti povolení čepového spoje, ke kterému by mohlo dojít například kvůli vibracím, jsem navrhnul speciální matici, která je zajištěna šroubem s válcovou hlavou a vnitřním šestihranným vybráním. Vnitřní závit matice má stoupání 1 mm, což v kombinaci se šestnácti polohami zajištění dává přesné vymezení vůlí v čepovém spoji. Každá poloha představuje stažení o 0,0625, respektive o 1/16 mm. Matice se dotahuje pomocí čtyř děr, do kterých pasuje klíč používaný například u úhlových brusek.



Obr. 26: Zajištění spoje proti povolení [autor]

5.5 Návrh sestavy náboje

Při navrhování sestavy náboje zadního kola jsem se inspiroval v uložení kol používaného u automobilů, kde na čepu náboje jsou dvě kuželíková ložiska, na kterých je uložen náboj a celá sestava je zajištěna šroubovým spojem (obr. 27).

5.5.1 Čep náboje

Jedná se o rotační součást, která je spojena s těhlicí pomocí uložení s přesahem a dotažení šesti šrouby (obr. 27). Čep náboje je namáhán především ohybovým momentem, proto má v místě uložení do těhlice větší průměr, než na svém konci. Konstrukce dutiny uvnitř čepu náboje má za následek snížení hmotnosti téměř o 50%, ale zároveň je zachována dostatečná pevnost součásti, protože se výrazně nezmění průřezový modul v ohybu.

5.5.2 Ložiska

V sestavě náboje jsou dvě kuželíková ložiska různých velikostí, uložena do „O“, která zajišťují přenos sil jak v radiálním, tak v axiálním směru. Pro výhodnější rozložení sil

je sestava opatřena jedním jehlovým ložiskem, které zajišťuje dostatečnou únosnost v radiálním směru.

5.5.3 Náboj

Na náboji je uloženo řetězové kolo a disk z lehkých slitin. Kolo je k náboji přišroubováno pěti šrouby M12 a řetězové kolo osmi šrouby M8. Toto spojení má za úkol vytvořit dostatečnou normálovou sílu mezi součástmi, která má za následek vznik třecího momentu pro přenos krouticího momentu jak pro pohon, tak k brždění. Náboj je navržen z hliníkové slitiny, kvůli minimalizaci neodpružené hmoty.

5.5.4 Zajištění proti axiálnímu pohybu

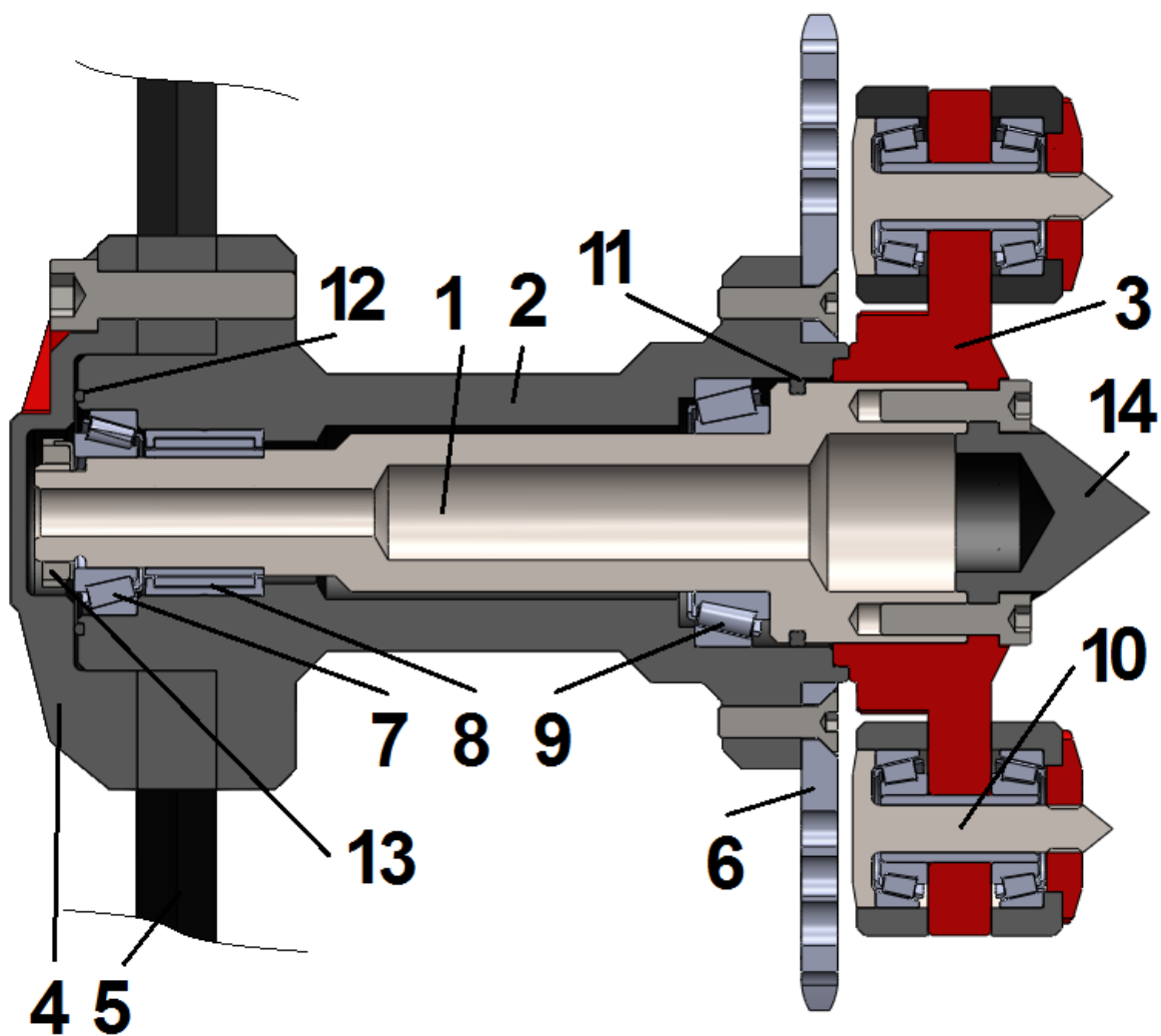
Pro zajištění proti axiálnímu pohybu náboje, respektive k vymezení vůlí kuželíkových ložisek, je sestava opatřena pojišťovacím závitovým spojem. Je použita matice KM s podložkou MB a čep náboje je opatřena speciální drážkou pro tuto podložku a příslušným závitem.

5.5.5 Utěsnění sestavy

Proti zánosu nečistot do tělesa náboje, a proti úniku maziva z něj, je sestava opatřena těsníci prvky. Mezi čepem náboje a nábojem je zvolen kluzný těsnící kroužek o průřezu do „X“ vyrobený z tvrdé gumy, kde vnější drážka slouží zároveň jako zásobárna pro plastické mazivo. Z druhé strany je sestava zavíčkovaná a mezi víčkem a nábojem se nachází obyčejný gumový těsnící kroužek, neboť zde nedochází k vzájemnému pohybu součástí.

5.5.6 Přehled dílů

Na obrázku 27 je v řezu znázorněna sestava náboje, včetně uložení do těhlice a příslušných čepových spojení. Přehled hlavních dílů: čep náboje (1), náboj (2), těhlice (3), víčko náboje (4), disk z lehkých slitin (5), řetězové kolo (6), kuželíkové ložisko 1 (7), jehlové ložisko (8), kuželíkové ložisko 2 (9), sestava čepového spoje (10), kluzné těsnění (11), těsnící kroužek (12), matice KM s podložkou MB (13), krytka čepu náboje (14).

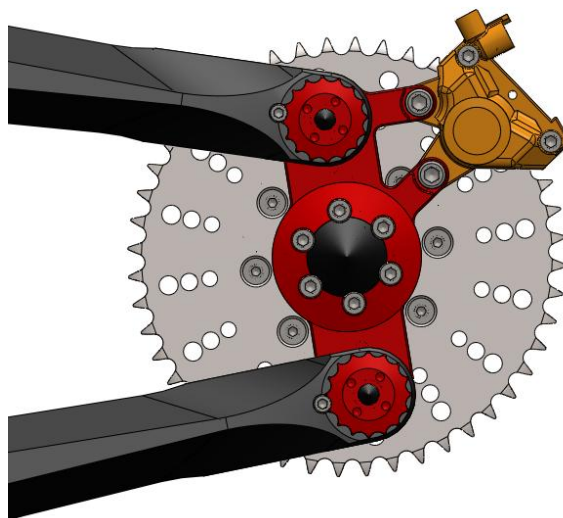


Obr. 27: Sestava náboje uložená v těhlici [autor]

5.6 Brzdný výkon

Podobně, jako u automobilu, má i u motocyklu hlavní vliv na brzdovou dráhu přední brzda. Rozdělení brzdného výkonu je zhruba 2/3 na přední a 1/3 na zadní brzdu (poměr určuje hlavně geometrie motocyklu, poloha těžiště apod.). Z toho důvodu se vepředu používají brzdové kotouče s větším průměrem a vzadu postačuje jeden menší.

Pro brzdění motocyklu jsem použil systém, který se běžně používá jen při podobných stavbách motocyklů. Místo brzdového kotouče je brzděno přímo řetězové kolo. Z tohoto důvodu jsem zvolil bezúdržbový řetěz *EK's QX-Ring*, který nevyžaduje vnější mazání. To znamená, že nemůže dojít ke styku maziva a brzdové plochy, tak zůstane zachován součinitel tření a nebude tedy ovlivněn brzdný výkon.



Obr. 28: Brzděné řetězové kolo [autor]

Na obrázku 28 je znázorněno uložení brzdiče. U běžných systémů odpružení je většinou brzdič připevněn na rameno kyvné vidlice. V tomto případě je brzdič připevněn k těhlici, aby se zaručila jeho konstantní vzdálenost od osy otáčení v každé poloze propružení.

5.7 Celá sestava



Obr. 29: Pohled na celou sestavu [autor]

6 Pevnostní analýzy

Pro základní analýzu napětí a deformací jsem vybral čtyři nejvíce namáhané díly – horní a dolní rameno, těhlici a čep náboje.

6.1 Působící síly

Z grafu 1 v kapitole 4.4 je patrné, že síla, která je potřebná ke stlačení pružiny k dorazu, je asi 7400 N. Toto je normálová síla vyvozena vozovkou, která působí na zadní kolo. Jedná se o statickou sílu potřebnou pouze ke stlačení pružiny, není zde brán ohled na dynamickou sílu, kterou je potřeba ke stlačování tlumiče. Tato síla není závislá na poloze stlačení tlumiče, ale na velikosti rychlosti a zrychlení, kterými je tlumič stlačován. Určit tak velikost této síly, která může mít velikost řádově až kN, nelze jednoduše analyticky.

Obecně se používá náhrada složitých a náročných výpočtů dynamického zatížení zavedením dynamického koeficientu. Náhrada spočívá v násobení statického zatížení tímto koeficientem, jehož velikost se pohybuje v rozmezí 2 až 3 v závislosti na podmínkách provozu a určení vozidla. [2]

S přihlédnutím k účelu motocyklu jsem pro analýzy použil zhruba 2 násobek síly potřebné ke statickému stlačení, tedy 15000 N. Jedná se o normálovou sílu vyvozenou vozovkou na zadní kolo.

6.2 Výpočtový model

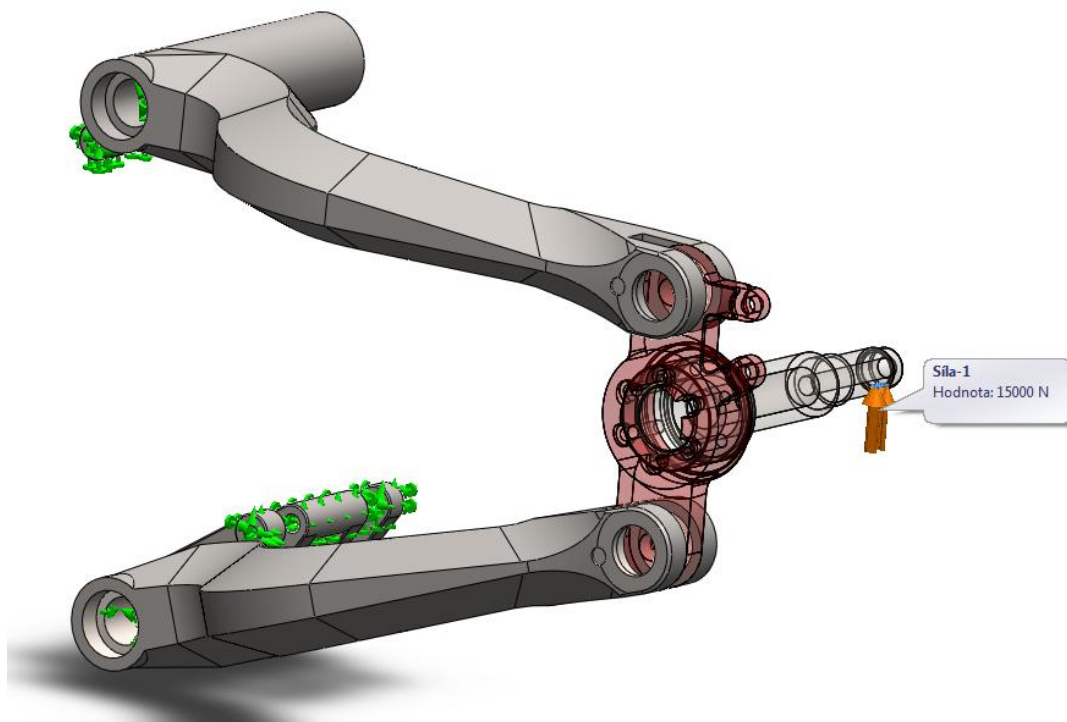
Výpočtový model se skládá z horního a dolního ramena, těhlice a čepu náboje. Jedná se o upravený geometrický model. Kvůli tvorbě sítě MKP byla odstraněna například některá „kosmetická“ zkosení nebo zaoblení menší než 1 mm. Tyto prvky neměly vliv na funkci.

6.3 Sestava ramen

Materiál ramen je ocel 11 523.0, která má mez kluzu $R_{e\ min}=355$ MPa.

6.3.1 Okrajové podmínky a působící síly

Ramena jsou v poloze plného stlačení. V uloženích pro čepy je vazba „fixní čep“ a v uložení tlumičů je vazba pevná. Toto uchycení nejlépe odpovídá reálnému uchycení při maximálním propružení. Síla je zavedena jako vzdáleně působící, je tedy přesně na nositelce normálové síly vyvozené vozovkou na kolo. Na obrázku 30 jsou čep náboje a těhlice zavedeny jako nedeformovatelné díly. Slouží pouze jako geometrie a k přenosu sil.



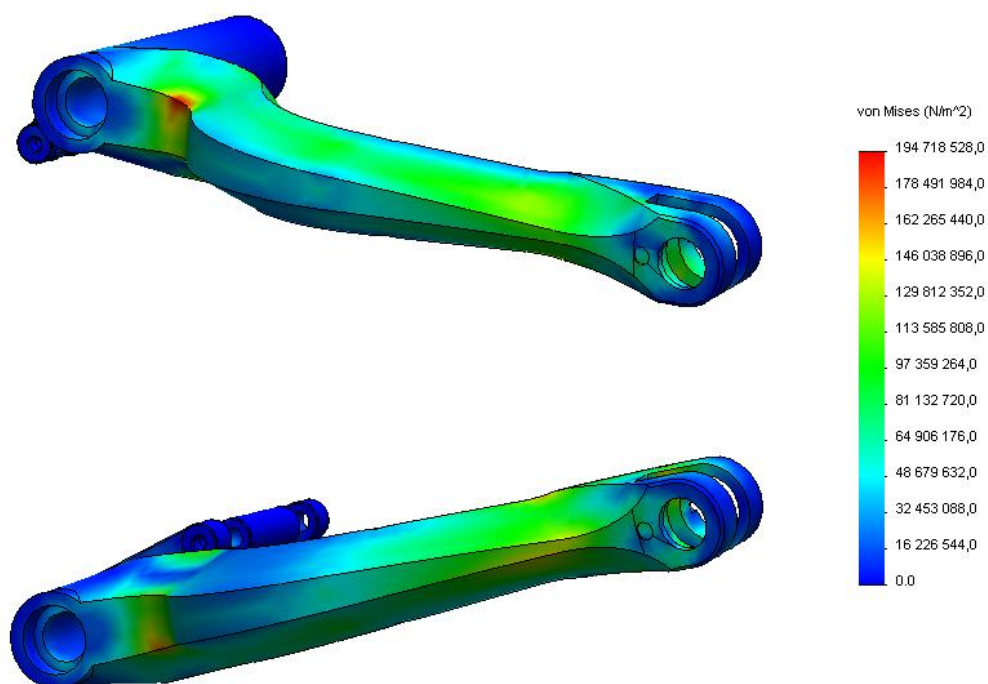
Obr. 30: Okrajové podmínky a působící síly [autor]

6.3.2 Napětí a deformace

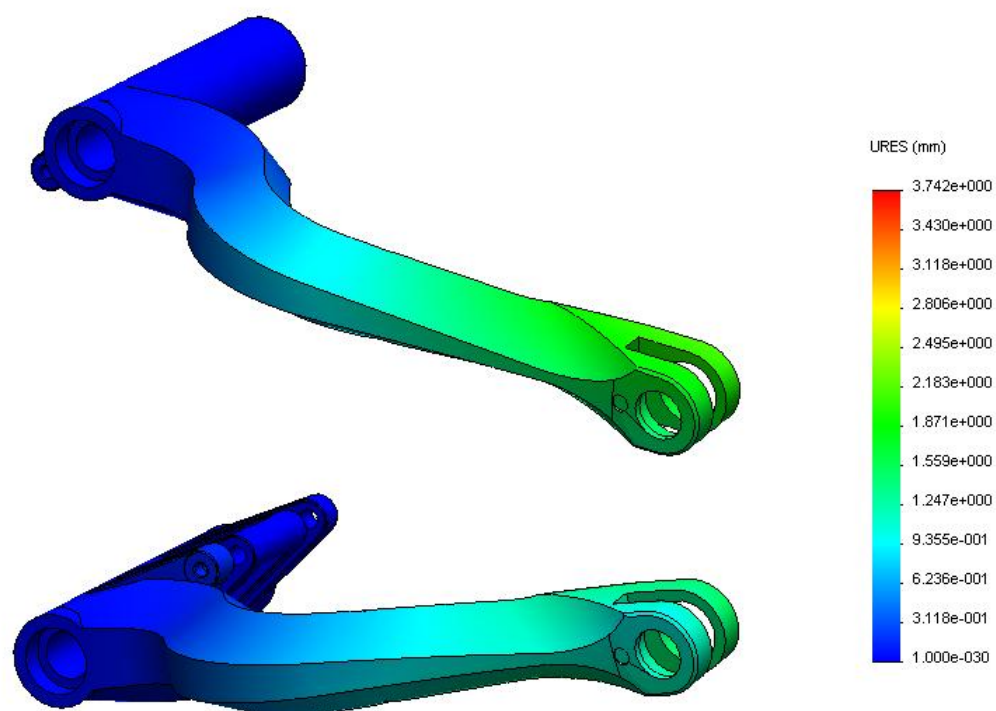
Maximální hodnota napětí (viz obr. 31) podle teorie HMM je přibližně 195 MPa. Tato hodnota je menší, než mez kluzu. V ohybech ramen se ovšem vyskytují místa se zvýšenou koncentrací napětí, které by bylo potřeba při optimalizaci návrhu přepracovat.

Velikost deformace ramen dle obrázku 32 je největší v zeleném spektru, tedy okolo 2,5 mm. Velikost posunutí působíště síly je přibližně 3,7 mm.

Jedná se o uspokojivé výsledky, vzhledem k typu motocyklu a stylu jízdy, bude k takovému namáhání docházet výjimečně.



Obr. 31: Napětí dle HMM v sestavě ramen



Obr. 32: Deformace ramen

6.4 Čep náboje a těhlice

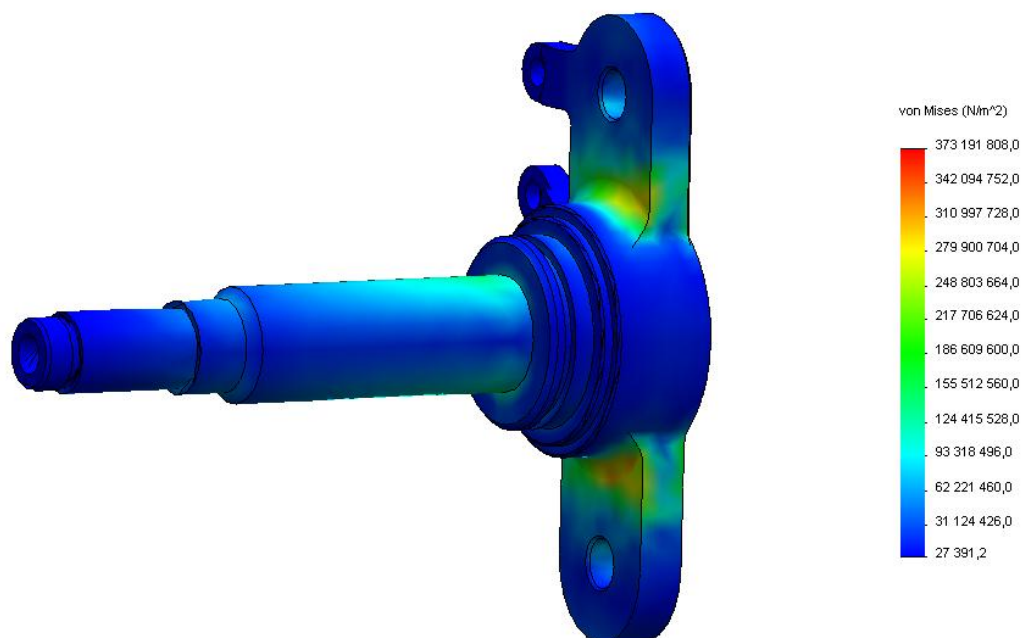
Materiál těhlice je hliníková slitina 7075 T6 s mezí kluzu $R_e=563$ MPa a materiál čepu náboje je ocel 12 010.0 s $R_e=295$ MPa.

6.4.1 Okrajové podmínky a působící síly

Těhlice je uložena v ramenech, což zaručí vazby, které nejvíce odpovídají skutečnosti. Výsledné napětí se tedy bude blížit reálné hodnotě, ale deformace, respektive maximální posuv, bude kvůli těmto vazbám zkreslený. Předpoklad je, že kolo s nábojem tvoří pevný celek, působící síla je tedy rozložena na všechna ložiska.

6.4.2 Napětí

Napětí na čepu náboje dosahuje maximálně 200 MPa a na vahadlu 373 MPa. Obě hodnoty vyhovují, nepřesahují mez kluzu pro daný materiál.



Obr. 33: Napětí na čepu náboje a těhlici

7 Závěr

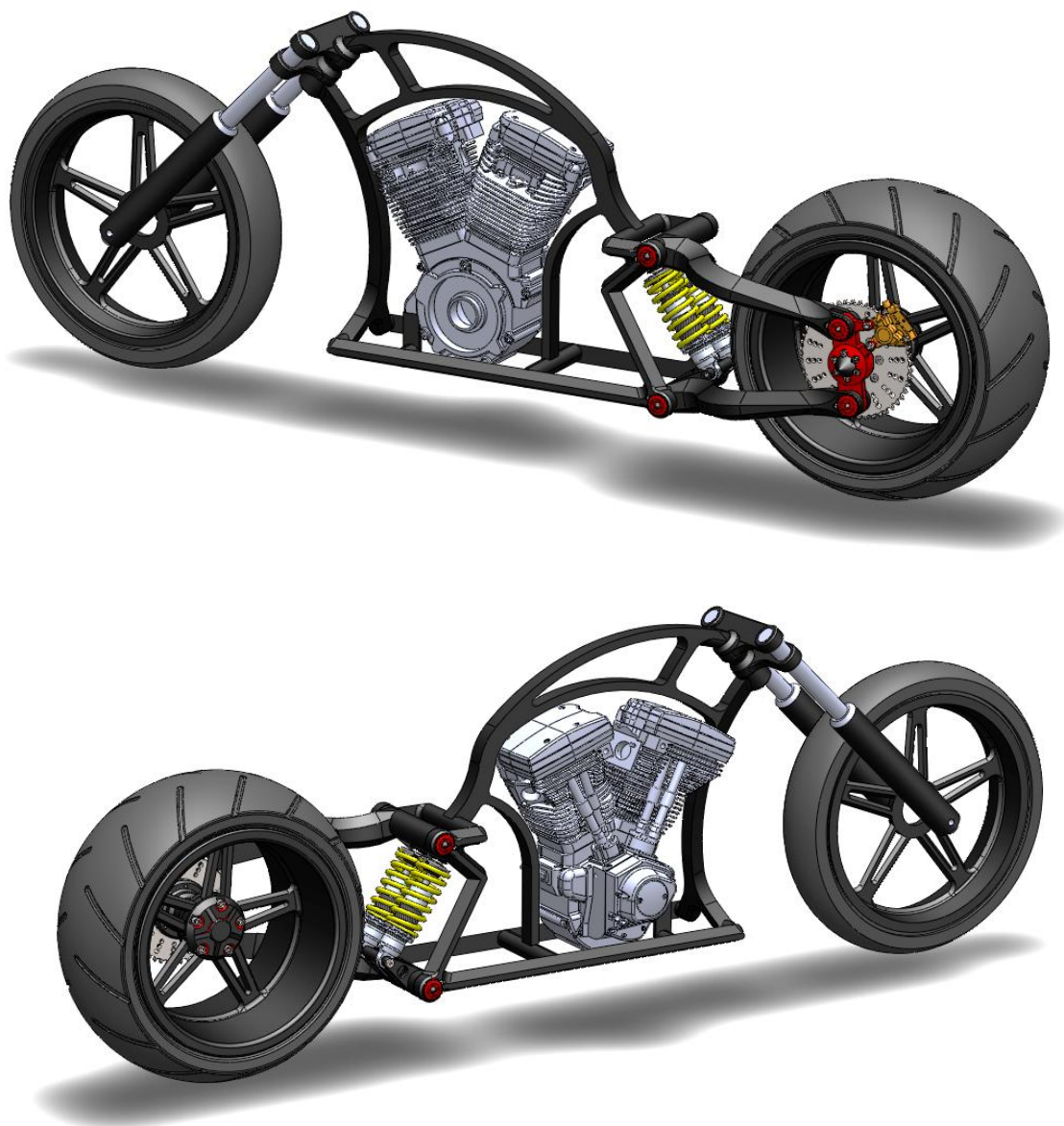
7.1 Závěrečné shrnutí

Cílem mé bakalářské práce bylo navrhnout zadní odpruženou jednoramennou nápravu motocyklu. Jádro práce, tedy navrhování geometrie, realizaci 3D modelu a pevnostní analýzu, jsem popsal v kapitole 4, 5 a 6. Při zpracování těchto úkolů jsem čerpal pouze ze svých znalostí, jak teoretických, tak praktických. Navrhnul jsem mechanismus odpružení, se kterým konkrétně jsem se v praxi nesetkal. Toto řešení tak přispívá k tvoření jedinečného vzhledu motocyklu, což bylo žádoucí, neboť jsem při návrhu neuvažoval o sériové výrobě, ale pouze o případné výrobě jednoho kusu. Kromě použitých sériově vyráběných komponent (které jsou popsány v kapitole 3), jsou všechny díly realizovány podle mých návrhů.

Hlavním přínosem práce pro mě je ten, že jsem se hlouběji zabýval designem motocyklu, tedy spojením vzhledu s technickým řešením. U mých dřívějších návrhů se totiž většinou jednalo pouze o návrh po vzhledové stránce. Všechny poznatky z bakalářské práce dále jistě využiji při dalším navrhování motocyklů a věřím, že každý nový návrh bude lepší a po technické stránce propracovanější, díky znalostem a zkušenostem, které jsem zde načerpal.

7.2 Kompletní model

Sestavu jsem pro demonstrování cíleného vzhledu doplnil o přední vidlici a disky z lehkých slitin s pneumatikami (o rozměrech: vzadu 300/35 r18 a vpředu 135/60 r21). Dále také modelem dvouválcového motoru[*] *Harley Davidson* pro lepší představu výsledného vzhledu.



Obr. 34: Přiblížení výsledného vzhledu

[*]model motoru-zdroj: www.grabcad.com

Zdroje a použitý software

Literatura

- [1] *Soudní inženýrství* [online časopis]. 2004, roč. 15, č. 3. *Rámy a odpružení motocyklů*, Prof. Ing. František Vlk, DrSc. [vid. 2014-06-01]. Dostupný z: <<http://www.sinz.cz/archiv/docs/si-2004-03-159-177.pdf>>. ISSN 1211-443X

- [2] HAVRÁNEK, Lukáš. *Pevnostní analýza a optimalizace rámu s kyvnou vidlicí motocyklu s víceválcovým motorem o objemu 1200ccm: diplomová práce*. Liberec: TUL, fakulta strojní, 2007. Vedoucí práce Ing. Pavel Brabec.

Software

Linkage X3, v2.5

SolidWorks 2012 Premium, SP5.0